

# НАДЕЖНОСТЬ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ СО СЛУЧАЙНЫМИ ВАРИАЦИЯМИ ПАРАМЕТРОВ

Ю. А. Медведев

---

*Владимирский государственный университет, ФМФ*

*Владимир, Россия*

*E-mail: medvedev@vlsu.ru*

Предложена модель областей возможных состояний многодвигательного электрогидравлического привода (МДЭГП) со случайными вариациями параметров в процессе функционирования, позволяющая получить оценку, характеризующую вероятность выполнения заданных свойств привода.

*Ключевые слова:* многодвигательные электрогидравлические приводы, случайные вариации параметров, надежность привода.

Надежность привода зависит от многочисленных и разнообразных факторов, которые являются причиной случайных вариаций параметров и сами по своей физической природе носят стохастический характер.

Оценивая надежность многодвигательного электрогидравлического привода можно теоретически исследовать модель его функционирования и оценить влияние различных факторов на его техническое состояние.

В настоящее время проблемы надежности двигателей освещены во многих публикациях, большинство из которых имеют математическую направленность. Для обеспечения высокой надежности, особенно жизненно важных технических систем, многодвигательный (многоканальный) электрогидравлический привод нашел широкое применение.

В зависимости от вида компоновки многодвигательного соединения гидропривод может характеризоваться различными показателями надежности, которые позволяют оценить состояние технического объекта.

Оценка надежности объекта предполагает многокритериальный подход, при котором предварительно задается количественное значение критериев надежности, которыми могут служить: вероятность  $P(t)$  безотказной работы в течение определенного времени  $t_p$ ; средняя наработка  $T_{cp}$  до первого отказа; интенсивность отказов  $\lambda(t)$ ; частота отказов  $f(t)$ ; параметр  $\omega(t)$  потока отказов; коэффициент и функция готовности  $k_T(t)$  и др.

Для обеспечения высокой надежности в МДЭГП помимо конструктивных (компоновка многодвигательных соединений), технологических и эксплуатационных мероприятий применяют резервирование (функциональное, структурное). Широкое применение получили многоканальные (многодвигательные) приводы с общим нерезервируемым выходным звеном. По методу формирования выходного сигнала многоканальные гидроприводы классифицируются на группы [1]: взаимосвязанных цепей, пересиливания, голосования, замещения. Практика показывает, что надежность многоканального гидропривода с общим нерезервируемым выходным звеном полностью определяется надежностью этого звена.

В условиях случайных вариаций параметров многодвигательного гидропривода оценка времени жизни его элементов, его функционирования, безусловно, должна осуществляться при вероятностном подходе.

Для углубленного изучения статических и динамических свойств многодвигательных электрогидравлических приводов и различных факторов, влияющих на надежность, применяют исследовательские ресурсные испытания.

Слово «ресурс» применительно к МДЭГП следует понимать как выявление ресурсов отдельных его элементов (гидронасоса, гидродвигателя, электрогидравлического управляющего устройства, чувствительных элементов и т.п.), отдельных каналов системы, от которых зависят его долговечность, безотказность, стабильность показателей быстродействия, точности и качества переходных процессов. В частности, к задачам таких испытаний относят изучение закономерностей изменения заданных свойств в процессе эксплуатации в зависимости от наработки, выбор допустимых значений параметров для заданной вероятности нормального функционирования привода, определение влияния внешних и внутренних воздействий на ресурс, безотказность привода и т.д.

Работоспособность электрогидравлических приводов в условиях, близких к реальным, определяется преимущественно с помощью ускоренных форсированных испытаний. Среди эксплуатационных факторов есть такие, которые заслуживают первостепенного внимания, например окружающая среда, в которой работает привод (температура, влажность, осадки, нежелательные примеси в рабочей жидкости и т.п.). Важным эксплуатационным фактором для гидропривода является температура рабочей жидкости и характер ее изменения в процессе работы привода, колебания и пульсации давления. Отказы (мгновенные или постепенные) возникают обычно при изменении значений параметров элементов.

Статистический подход к оценке факторов, влияющих на надежность гидропривода, обусловил тенденцию использования математических приемов в практике ресурсных испытаний, в частности методов теории чувствительности. Теория надежности и теория чувствительности рассматривают явления одной и той же природы, поэтому функции чувствительности применяют при решении ряда задач теории надежности, например задач определения вероятности того, что показатель работоспособности МДЭГП находится в заданных пределах в момент его включения после хранения.

Построение модели функционирования электрогидравлического привода и оценка надёжности его в общем виде представляют собой сложную задачу [1, 2].

В реальном процессе функционирования привода в любой фиксированный момент времени его мгновенное состояние можно количественно охарактеризовать набором величин  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), которые отображают основные свойства привода или его параметры, например режимные координаты, с требуемым приближением к действительности.

В общем случае совокупность параметров привода можно рассматривать как компоненты случайного вектора  $\vec{x}$  в  $n$ -мерном пространстве. В этом случае работоспособность привода в каждый момент времени будет характеризоваться изображающей точкой  $A_i$  с координатами  $x_i$ , представляющей собой оконечность вектора (см. рис. 1). Эта точка в процессе работы занимает различные положения в области  $Q$ , которые в совокупности представляют возможные состояния привода.

Вследствие случайных вариаций параметров привода, т. е. при износе рабочих элементов, необратимых изменениях физико-химических свойств материалов, например рабочей жидкости, и процессах старения, при работе привода происходит изменение его свойств и эксплуатационных показателей. Поэтому на все свойства МДЭГП должны быть заданы соответствующие допуски, т.е. указаны их допустимые изменения, обусловлен-

ные воздействием факторов, дестабилизирующих нормальное функционирование привода.

В принятой условной модели совокупность  $n$  режимных координат образует  $n$ -мерную область, которая может быть замкнутой или разомкнутой и которую можно называть рабочей областью  $Q_p$ . Соответственно область  $Q_{np}$  будет нерабочей.

Области  $Q_p$  и  $Q_{np}$  входят в область, в которой случайным образом блуждает рабочая точка  $A$ , описывающая некоторую траекторию. При этом, если рабочая точка  $A$  находится в области  $Q_p$ , то привод считается исправным, работоспособным, если же покидает эту область и переходит в область  $Q_{np}$  – происходит отказ.

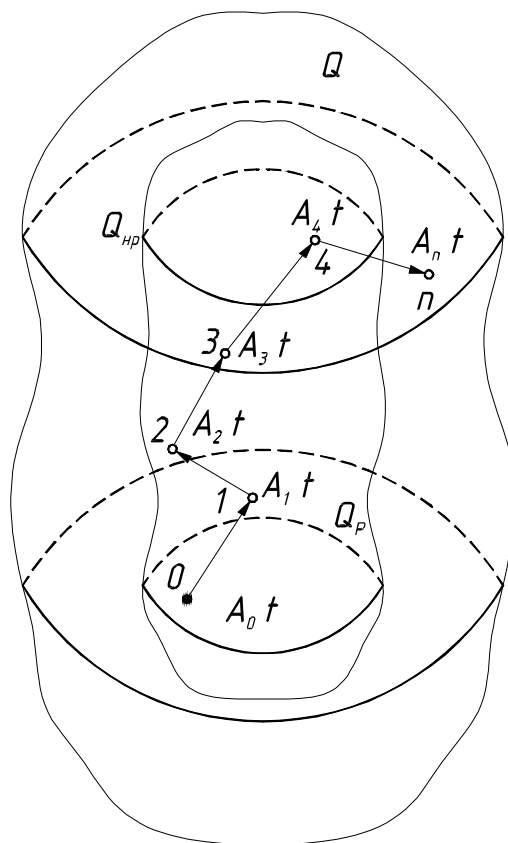


Рис. 1. Условная модель областей возможных состояний МДЭГП со случайными вариациями параметров в процессе функционирования

Очевидно, траектория движения этой точки может служить геометрической иллюстрацией состояния привода в процессе постепенного утрачивания некоторых функциональных свойств при эксплуатации, т.е. давать качественное представление о характере изменения работоспособности привода.

Работоспособность привода может быть оценена вероятностью, найденной в соответствии с выражением

$$P\{\bar{x} \in Q_p\} = \int \dots \int f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n, \quad (1)$$

где  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – функция распределения случайных значений параметров.

Величины  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , количественно отображающие значения функциональных параметров (координат) привода, представляют собой в последнем случае частотные значения в момент времени случайных функций  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ , которые в совокупности

характеризуют процесс работы привода. Режимные координаты могут иметь различное физическое содержание, например отображать процессы изменения во времени электро-механических, гидравлических и других параметров привода.

Качественная работа МДЭП оценивается выражением (1) при условии, что

$$P\{\vec{x} \in Q_p\} \geq P_{тр}, \quad (2)$$

где  $P_{тр}$  – требуемая вероятность надежной работы привода.

Используя теорию чувствительности [3, 4], функции чувствительности будем рассматривать как частные производные от показателей работоспособности привода по изменяющимся (варьируемым) параметрам. Важнейшей задачей, ставшей уже классической, является задача определения вероятности того, что показатель работоспособности привода в момент времени  $t$  удовлетворяет условию (2).

Допустим, что случайные вариации параметров (координат) некоррелированы и подчинены нормальному закону распределения. Работоспособность привода оценивается функцией качества

$$K = \hat{K}(x_1, x_2, \dots, x_n, t), \quad (3)$$

которая при малых отклонениях параметров от номинальных значений при разложении представляется в виде

$$K = K(M_{x_1}, M_{x_2}, \dots, M_{x_n}, t) + \sum_{i=1}^n u_i(t) \Delta x_i, \quad (4)$$

где  $u_i(t) = (\partial k / \partial x_i) \Delta x_{i=0}$  – функция чувствительности;  $M_{x_i}$  – математические ожидания случайных параметров ( $i = 1, 2, \dots, n$ );  $M[k] = k(M_{x_1}, \dots, M_{x_n}, t)$  – математическое ожидание функции (3);  $\sigma_k^2(t) = \sum_{i=1}^n u_i^2(t) \sigma_i^2$  – дисперсия функции (3).

При нормальном законе распределения параметров (режимных координат) вероятность того, что функция (3) в момент времени  $t$  находится в допустимых пределах, равна

$$P(k^* < k < k^{**}, t) = \frac{1}{2} \left\{ \Phi \left[ \frac{k^{**} - M[k]}{\sqrt{2}\sigma_k(t)} \right] - \Phi \left[ \frac{k^* - M[k]}{\sqrt{2}\sigma_k(t)} \right] \right\}, \quad (5)$$

где  $k^*$  и  $k^{**}$  – минимальное и максимальное значения функции качества;  $\Phi(z)$  – интеграл вероятности [5, 6] вида:

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt.$$

Для определения функций чувствительности, необходимых для нахождения дисперсии  $\sigma_k^2$ , можно воспользоваться разложением Грама – Шарлье [7, 8] функции распределения. В этом случае оценку надежности привода по совокупности критериев работоспособности  $k_v$  ( $v = 1, 2, \dots, l$ ) определяют как вероятность того, что каждый из  $v$  критериев в момент времени  $t$  находится в допустимых пределах:

$$P(t) = \int_{k_l^*}^{k_l^{**}} \int_{k_{l-1}^*}^{k_{l-1}^{**}} \dots \int_{k_1^*}^{k_1^{**}} f(k_1, k_2, \dots, k_l) dk_1 dk_2 \dots dk_l \frac{n!}{r!(n-r)!}, \quad (6)$$

где  $f(k_1, k_2, \dots, k_l)$  –  $l$ -мерный закон распределения;  $k_v^*$ ,  $k_v^{**}$  ( $v = 1, 2, \dots, l$ ) – допустимые пределы изменения критериев работоспособности привода.

Для решения выражения (6) рекомендуется разложение Грама – Шарлье для  $f(k_1, \dots, k_l)$ , учет первых членов которого дает

$$P(t) = \int_{k_1^*}^{k_1^{**}} \dots \int_{k_l^*}^{k_l^{**}} \varphi(k_1, \dots, k_l) \times \left[ 1 + \frac{1}{3!} \sum_{i=1}^l \left( a_i^3 - \frac{3D_{ij}a_i}{D} \right) \times M[k_i^3] dk_1 dk_2 \dots dk_l \right], \quad (7)$$

где

$$\varphi(k_1, \dots, k_l) = \frac{1}{\sigma_{k_1} \sigma_{k_2} \dots \sigma_{k_l} \sqrt{(2\pi)^l D}} e^{-\frac{1}{2D} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l D_{ij} \frac{k_i - M[k_i]}{\sigma_i} \frac{k_j - M[k_j]}{\sigma_j}};$$

$$a_v = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^l D_{iv} k_i; \quad D = \begin{vmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1l} \\ \dots & & & & \dots \\ r_{l1} & r_{l2} & r_{l3} & \dots & r_{ll} \end{vmatrix};$$

$r_{ij}$  – коэффициенты корреляции величин  $k_i$  и  $k_j$ ;  $D_{ij}$  – алгебраическое дополнение элемента  $r_{ij}$  определителя  $D$ ;

$$M[k_i] = K(M_{x_1}, M_{x_2}, \dots, M_{x_n}, t) - \sum_{j=1}^l \sum_{v=1}^l r_{x_j x_v} U_{ijv}(t) + \dots;$$

$$\sigma_{k_i}^2 = + \sum_{j=1}^l \sum_{v=1}^l r_{x_j x_v} U_{ij}(t) U_{iv}(t) + \dots;$$

$$r_{ij} = \frac{1}{\sigma_{k_v} \sigma_{k_i}} \left[ \sum_{j=1}^l \sum_{v=1}^l r_{x_j x_v} U_{ij}(t) U_{iv}(t) \right].$$

Из разложения Грама – Шарлье видна необходимость определения функций чувствительности первого и второго порядков, что является довольно сложной задачей, особенно при оценке надежности привода по совокупности критериев и при большом числе варьируемых параметров (режимных координат).

Наиболее приемлемым методом оценки надежности работы привода является многокритериальный подход [7]. С использованием вычислительного эксперимента на ЭВМ возможен обоснованный выбор критериальных ограничений и нахождение компромиссного решения по совокупности критериев.

При числе режимных координат, равных, например, двум ( $X, Y$ ) имеем плоскость, на которой для каждого варианта проектируемого привода может быть выделена область режимных координат, в которой обеспечиваются заданные значения качественных показателей, т.е. вероятность обеспеченности

$$P\{X, Y \in S\} = \int \dots \int K(X, Y) dX dY,$$

где  $f(X, Y)$  – заданная плотность вероятности.

Учитывая, что в действительности режимы работы привода неравноценны, наилучшие показатели качества в вероятностном смысле могут быть получены в общем виде по выражению

$$L\{X, Y \in S\} = \int \dots \int K(X, Y) f(X, Y) dX dY, \quad (8)$$

где  $K(X, Y)$  – обобщенный показатель качества, зависящий от структуры привода и значений режимных координат (или значений параметров привода).

Вычисляя соответствующий многократный интеграл (8) можно получить оценку, характеризующую вероятность выполнения заданных (или требуемых) свойств привода со случайными вариациями параметров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Сырицын, Т. А.* Эксплуатация и надежность гидро- и пневмоприводов / Т. А. Сырицын. М. : Машиностроение. 1990. 282 с.
2. *Комаров, А. А.* Надежность устройств самолетов / А. А. Комаров. М. : Машиностроение, 1986. 276 с.
3. Методы теории чувствительности в автоматическом управлении / Под ред. Е. Н. Розенвассера и Р. М. Юсупова. Л. : Энергия, 1981. 324 с.
4. *Росин, М. Ф.* Статистическая динамика и теория эффективности систем управления / М. Ф. Росин, В. С. Булыгин. М. : Машиностроение, 1981. 328 с.
5. *Гамынин, Н. С.* Гидравлический привод систем управления / Н. С. Гамынин. М. : Машиностроение, 1982. 308 с.
6. Гидравлические и пневматические силовые системы управления / Под ред. Дж. Блэкборна. М. : Иностранная литература, 1972. 316 с.
7. *Соболь, И. М.* Выбор оптимальных параметров со многими критериями / И. М. Соболь, И. Б. Статников. М. : Наука, 1981. 296 с.
8. *Medvedev, Yu. A.* Reliability of Multimotor Electrohydraulic Drives with Random Parameter Variation / Yu. A. Medvedev // Russian Engineering Research. 2010. V. 30. № 11. P. 1077–1080. Allerton Press, Inc. (NY, USA).